

预应力锚索锚固力损失与岩土体蠕变耦合效应研究

王清标^{1,2} 张聪¹ 王辉¹ 温小康¹
施振跃¹ 吕荣山¹ 王天天¹

(1 山东科技大学资源与土木工程系 山东泰安 271019)

2 山东华联矿业股份有限公司 山东沂源 256119)

摘要: 因预应力锚索锚固力损失而导致锚固失效的工程事故屡屡发生, 锚索锚固力损失与岩土体蠕变之间存在复杂的耦合效应关系, 通过理论分析和模型研究, 在岩土体常用流变模型基础上建立了基于应变相等的耦合效应计算模型, 并进行了模型验证。建立二者之间的耦合效应模型, 确立二者之间的计算关系式, 为预应力锚固工程的设计、施工、安全运行管理以及锚固力损失的控制与补偿技术提供理论基础和技术手段。

关键词: 锚固力损失 蠕变 耦合效应 计算模型

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2015.01.005

1 引言

虽然预应力锚索锚固技术已成为边坡加固工程的关键技术^[1-3], 但是, 因锚索锚固力损失而导致锚固失效的高陡边坡失稳事故屡见不鲜^[4-5]。锚索锚固力损失关系到锚固工程的安全性、有效性、可靠性和耐久性, 是锚固技术的关键问题。

丁多文、罗国煜、白世伟等^[6]根据广义Kelvin模型, 研究岩体随时间的变形产生的预应力损失, 求出了单根锚索加固中自由段岩体受到预应力的作用下产生的蠕变理论解。陈安敏、顾金才等^[7]做的锚索张拉吨位随时间变化规律的模型试验, 取得了软岩加固中锚索张拉吨位随时间的变化规律。高大水、李端友等^[8-9]对三峡工程船闸锚索有效锚固力变化的监测进行了研究, 重点分析了锚索的受力状态、锚固效果及锚固力损失情况, 总结出了锚索预应力变化的一些规律。何思明、陆锡铭等^[10-11]对预应力锚索群锚效应进行了详细研究, 他把预应力锚索体系分解成稳定围岩体和预应力锚索锚固段两个子系统, 然后对各子系统分别进行分析研究。朱哈逐、尚岳全、叶慧飞等^[12-14]在《锚索预应力长期损失与坡体蠕变耦合分析》一文中, 对预应力损失与坡体蠕变做了一定分析。朱本珍、聂彪等也做了一些相关

研究^[15-18]。

由上可以看出, 国内外诸多学者对预应力锚索锚固力损失进行一定的研究, 但对锚索锚固力变化与岩土体蠕变耦合效应研究的较少, 已有的研究也存在一些值得商讨之处。

有的模型研究把锚索的预应力损失和岩土体的蠕变分开单独考虑, 没有考虑二者之间的耦合效应关系, 在锚索预应力不变的情况下, 求出边坡的蠕变, 必然导致计算的结果偏大。

有的蠕变模型理论推导是建立在应力相等的假设情况下, 这是一个错误的假设, 其实理论推导应建立在应变相等的情况下; 而且所进行的有限元建模研究和模型验证仅仅建立在陈安敏、顾金才等已做的锚索张拉吨位随时间变化规律的模型试验, 其可靠性就难以保证。

已有的模型实验中模型尺寸太小, 那么边界条件约束影响、模型简化与假设、相似比尺的确定、材料相似性考虑、锚索孔成孔方式、砝码恒压加载方式等都会对试验结果产生过大影响继而影响结果分析的正确性。

深入研究预应力锚索锚固力损失与岩土体蠕变之间的耦合效应关系, 建立锚索锚固力变化和岩土体蠕变的耦合效应模型, 建立锚索锚固力变化和岩土体蠕变的关系计算式, 对锚固工程的设

设计、施工和安全运行管理、提高工程的经济效益和社会效益,具有重要的理论意义和工程实践意义。

2 耦合效应机理分析

岩土体因不连续性和各向异性而具有流变特征,在外荷载作用下,受荷区域的岩土体内部结构和各个组成单元在外荷载作用下将产生塑性压缩或相对变位,即发生蠕变现象,根据荷载大小及蠕变变形的最后稳定值或极限值,又分为稳定蠕变和不稳定蠕变^[19-20]。

预应力锚索加固其实质就是预应力锚索将结构与岩土体紧密连接在一起,形成共同作用的工作体系,利用锚索周围的岩土体的抗剪强度来传递结构物的拉力或保持坡体开挖面的自身稳定^[21-22]。从预应力锚索工作原理来看,锚索变形与被加固岩土体的蠕变变形是一致的,即岩土体发生蠕变,锚固力(锚索的内力)必将发生变化,二者之间的变化过程具有一定的对应关系并且相互影响,岩土体蠕变使预应力锚索锚固力发生变化,反之,如果预应力锚索锚固力发生变化,岩土体的蠕变量也会随之发生改变,亦即在岩土体蠕变和预应力锚索锚固力变化之间存在耦合效应。

3 耦合效应模型研究

3.1 岩土体常用流变模型分析

由于岩土体是一个粘弹塑性的综合体,其力学性质十分复杂,其弹性变形特征、塑性变形特征以及流变变形特征因受力状态的不同而有不同的表现特征,当一种岩石当受力状态发生改变时,其可能表现出弹性、弹塑性、粘弹性或粘弹塑性的变形特性。岩土体的本构关系可以用这些理想模型的合理组合来构成。较常用的岩土体流变模型有以下几种^[23-25]。

(1) 马克斯威尔(Maxwell)体:

Maxwell模型(M体)是由弹簧(E)和粘性元件(η)串联而成,如图1所示。其本构方程为

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (1)$$

该模型可描述应力保持不变而岩土体匀速蠕变的现象,亦可描述变形保持不变而应力匀速衰减的松弛现象。

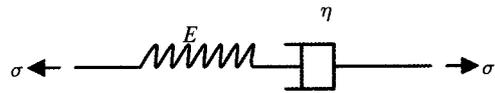


图1 Maxwell模型

(2) 开尔文(Kelvin)体:

Kelvin(K体)模型是由弹簧(E)和粘性元件(η)并联而成,如图2所示。其本构方程为:

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon} + E \epsilon \quad (2)$$

该模型可解释在应力作用下应变随时间变化的蠕变现象,当时间趋向于无穷大时,应变将趋于某一有限值;该模型不能反映瞬时应力松弛现象和弹性变形现象。

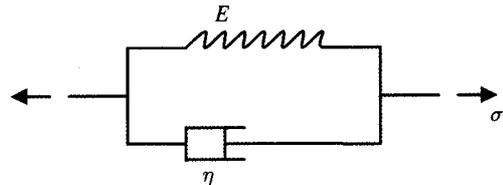


图2 Kelvin模型

(3) 广义开尔文(General Kelvin)体

该模型由弹簧(E_H)与Kelvin体串联组成,如图3所示。其本构方程为

$$\frac{\eta_K}{E_H + E_K} \dot{\sigma} + \sigma = \frac{E_H E_K}{E_H + E_K} \epsilon + \frac{\eta_K E_H}{E_H + E_K} \dot{\epsilon} \quad (3)$$

该模型能够充分反映粘弹性质,同Kelvin模型一样,应变随时间变化而变化,当时间趋向于无穷大时应变趋于某一有限值。同时它还有Maxwell模型的瞬时弹性和应力松弛等特点。

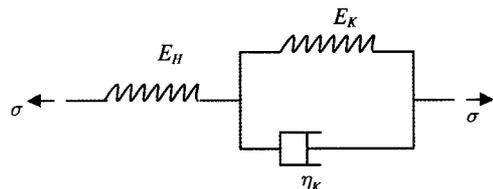


图3 广义开尔文体

3.2 建立耦合效应模型

边坡岩土体的流变模型可以采用General Kelvin模型,其计算模型如图3。然而,当考虑到边坡的蠕变和锚索预应力损失之间的耦合作用时,General Kelvin模型显然是不符合要求的。考虑锚索预应力的作用,建立耦合效应模型如图4。

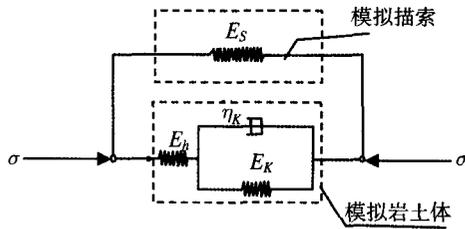


图4 锚索与岩土体蠕变耦合模型

其中 E_s 为锚索的等效弹性模量，考虑到锚索的初始应变 ε ，锚索和边坡的岩土体之间构成一个自平衡体系，当岩土体发生蠕变的同时，锚索内的预应力也相应随之发生变化，最终二者达到新的平衡稳定状态，该模型能反映应力松弛现象和瞬时弹性变形现象。

该计算模型在General Kelvin计算模型基础上考虑了锚索预应力变化和岩土体蠕变之间的耦合效应关系，与工程实际情况相符合，特别是对于锚索间距相对较小和锚索自由段较长情况下的预应力锚索锚固工程。

4 耦合效应模型的本构方程推导

4.1 耦合效应模型的本构方程

根据所建立的耦合效应计算模型图2.6，进行计算模型的本构方程推导建立模型本构方程。其中对于岩土体，满足方程：

$$\sigma_k + \frac{\eta_k}{E_k + E_h} \dot{\sigma}_k = \frac{E_k E_h}{E_k + E_h} \varepsilon_k + \frac{\eta_k E_k}{E_k + E_h} \dot{\varepsilon}_k \quad (4)$$

其中： E_h 为瞬时弹性模量， E_k 为滞后弹性模量， η_k 为粘滞系数，其数值可通过室内试验及参数反演确定。

对于均质岩土体，假设锚索体自由段长度内的锚索体预应力均匀分布在均质岩体上，那么锚索体的弹性模量可以等效转化为：

$$E_s = El \times A_s / A_r \quad (5)$$

其中 El 为锚索体实际的弹性模量， A_s 为锚索体的面积， A_r 为锚索有效锚固范围内岩体的面积。

同时考虑到锚索体和岩体的耦合关系，则有 $\sigma = \sigma_s + \sigma_k$ ， $\varepsilon = \varepsilon_s = \varepsilon_k$ ，可得：

$$\sigma_k = \sigma - \sigma_s = \sigma - \varepsilon_s E_s = \sigma - \varepsilon E_s \quad (6)$$

把式(6)代入(4)，整理可得到锚索与岩土体蠕变耦合效应模型的本构方程：

$$\sigma + \frac{\eta_k}{E_k + E_h} \dot{\sigma} = \frac{E_h E_k + E_h E_s + E_s E_k}{E_k + E_h} \varepsilon + \frac{E_h + E_s}{E_k + E_h} \eta_k \dot{\varepsilon} \quad (7)$$

4.2 耦合效应模型的蠕变方程

当 $\sigma = \sigma_c = const$ ，本构方程(7)可化为：

$$\dot{\varepsilon} + M\varepsilon = N\sigma_c \quad (8)$$

式中：

$$M = \frac{E_h E_k + E_h E_s + E_s E_k}{(E_h + E_k)\eta_k}, \quad N = \frac{E_h + E_k}{(E_h + E_k)\eta_k}$$

考虑初始条件：当锚索体初始不变的荷载加在被锚固体系统上的瞬间($t=0$)，岩土体发生弹性变形，其应变为 ε_0 。即 $t=0$ 时， $\varepsilon = \varepsilon_0 =$

$\frac{\sigma_c}{E_h + E_s}$ ，求解(8)微分方程，可得：

$$\varepsilon = -A \exp(-Mt) + \frac{N}{M} \sigma_c \quad (9)$$

式中：

$$A = \frac{E_h^2 \sigma_c}{(E_h + E_s)(E_h E_k + E_h E_s + E_s E_k)}$$

方程(9)即为耦合效应计算模型的蠕变方程，该方程可以反映瞬时弹性变形，且当 $t \rightarrow \infty$ 时，对式(9)求极限，可得耦合效应计算模型的极限应变为 $\varepsilon = N\sigma_c / M$ 。

考虑到卸载，即当 $t=t_l$ 时开始进行卸载， $\sigma=0$ ，此时的应变可由(9)计算求得，并考虑瞬时弹性恢复，其恢复量为 $\frac{\sigma_c}{E_h + E_s}$ ，所以

$$\varepsilon_{t=t_l} = -A \exp(-Mt_l) + \frac{N}{M} \sigma_c - \frac{\sigma_c}{E_h + E_s} ; \text{ 求解}$$

(8)微分方程($\sigma_c=0$)，可得卸载后的应变变化方程：

$$\varepsilon = A[\exp(Mt_l) - 1] \exp(-Mt) \quad (10)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时，对式(10)进行求极限，其值为零，因此耦合效应计算模型可反映弹性后效，但不能反映粘性流动。

4.3 耦合效应模型的松弛方程

当 $\varepsilon = \varepsilon_c = const$ ，本构方程(7)可化为：

$$\dot{\sigma} + U\sigma = V\varepsilon_c \quad (11)$$

式中：

$$U = \frac{E_h + E_k}{\eta_k}, \quad V = \frac{E_h E_k + E_h E_s + E_s E_k}{\eta_k}$$

考虑初始条件：当锚索体初始应变加在系统上的瞬时，岩体的弹性变形完成，其岩体的应变应为所加总的应变为 ε_c 。即 $t=0$ 时， $\sigma = \varepsilon_c(E_h + E_s)$ ，求解(11)微分方程，可得：

$$\sigma = B \exp(-Ut) + \frac{V}{U} \varepsilon_c \quad (12)$$

式中： $B = \frac{E_h^2 \varepsilon_c}{E_h + E_k}$

式(12)即为考虑了锚索预应力损失与坡体介质材料蠕变耦合后，在锚索初始应变量为的条件下，坡体介质材料上均布应力的本构模型公式。锚索内力就等于作用于坡体上的总的预应力之和，即：

$$F = \sigma \times Ar \quad (13)$$

需要说明的是，在式(13)中，把坡体介质材料上的应力看成是均布压应力，而在实际情况下，锚索作用在坡体上的预应力必须要达到一定的深度后才可能是均匀分布^[26-27]，因此计算会有所简化，但是在实际工程中，一般都采用群锚，同时锚索自由段的长度与锚索的间距相比都比较大，锚固范围内岩土体性质变化不大，因此计算误差影响较小，该公式具有较大的实用价值。

5 耦合效应模型验证

为验证耦合效应模型的正确性，以总参工程兵三所的陈安敏、顾金才、沈俊、明治清等做的锚索张拉吨位随时间变化规律的模型试验为参考对象^[7]，进行对比分析研究，试验模型、岩土体参数取值见图5和表1。

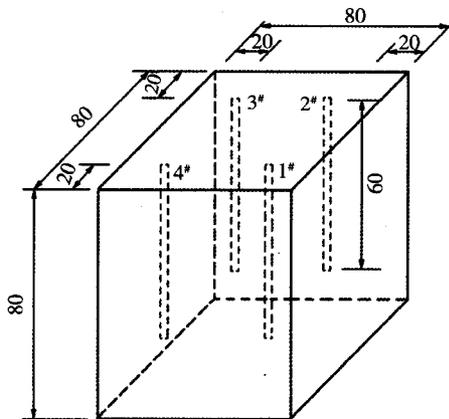


图5 模型结构尺寸^[7]

表1 黄粘砂土材料物理力学参数^[7]

含水量 /%	容重 /kN·m ³	单轴抗压强度 /MPa	单轴抗拉强度 /MPa	变形模量 /MPa	粘聚力 /kPa	内摩擦角 / (°)
16.5	20	0.15	0.04	20.66	11	19

本文理论计算结果与文献[7]模型试验实测结果对比如图6、图7和表2。从图中可以看出，理论计算曲线和试验实测数据比较近，拟合较好，从而验证了考虑耦合效应理论的正确性、有效性和可行性。

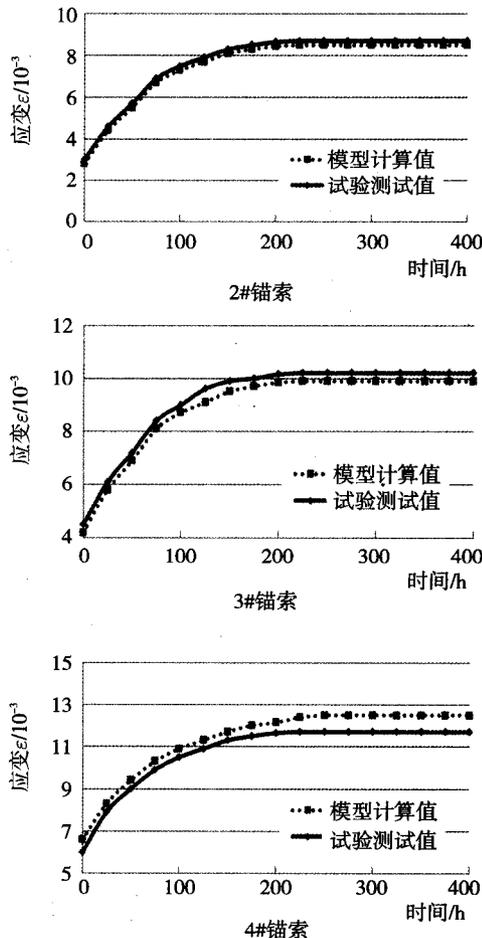
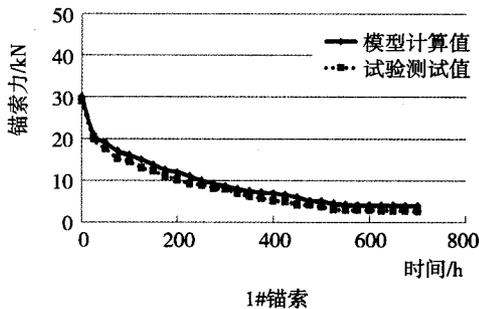


图6 锚索试验测试与耦合模型计算蠕变曲线比较图



1#锚索

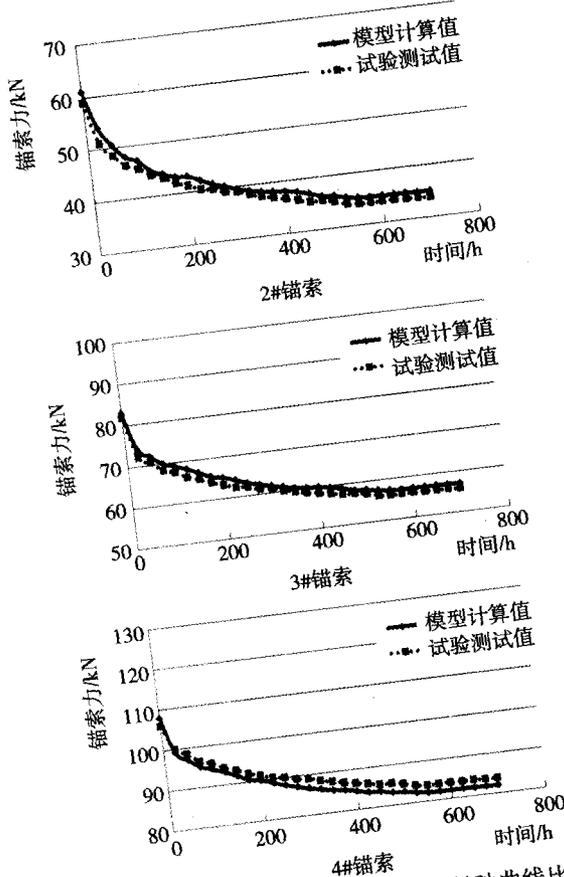


图7 锚索试验测试与耦合模型计算松弛曲线比较图

表2 锚索的理论计算值和试验测试值各自稳定后的数值对比

锚索编号		蠕变曲线			松弛曲线	
		瞬时变形 10^{-3}	曲线最后稳定值 10^{-3}	稳定时间 (h)	曲线最后稳定值 MPa	稳定时间 (h)
锚索1	试验曲线	—	—	—	7.99	510
	理论计算	0.63	7.21	196	8.32	518
锚索2	试验曲线	2.65	9.10	220	31.88	520
	理论计算	2.70	9.12	212	31.99	526
锚索3	试验曲线	4.55	10.15	240	59.00	540
	理论计算	4.61	10.17	226	59.21	550
锚索4	试验曲线	6.18	11.16	250	86.78	540
	理论计算	6.22	11.20	235	86.82	550

6 讨论

该耦合效应模型理论分析是建立在假定整个岩土体是均匀的并且受均布力的作用，但是在实际情况下，岩土体未必是均匀的，锚固力也是达到一定的深度后才可能均匀分布^[26-27]，基于这个假设推导出的计算公式和工程实际有一定的差别。但是在实际工程中，一般情况下都采用群锚

结构，锚固范围内岩土体性质变化不大，锚索自由段的长度比较长（与锚索间距相比），尤其是对于锚索间距相对较小，而岩土体自由段较长情况下的锚固工程，岩土体受力不均匀现象影响较小，耦合效应模型虽有所简化，但较符合实际情况，具有较大的工程实用价值。

7 结论

(1) 研究预应力锚索锚固系统的锚固效果时，不能把预应力锚索锚固力损失与岩土体蠕变分开单独考虑，应该基于二者之间的耦合效应进行探究。在构建耦合效应模型时，解决模型理论推导过程中合理假设是关键问题，是建立在应力相等的假设情况下，还是建立在应变相等的假设情况下，不同的假设条件所推导出的本构方程、蠕变方程和松弛方程是不同的。根据工程实际情况和理论分析，模型理论推导应当建立在应变相等的情况下。

(2) 建立锚索锚固力变化与边坡岩土体蠕变的耦合效应模型符合工程实际情况，推导出的考虑耦合效应的本构方程、松弛方程和蠕变方程，能够从理论上解决锚固力变化与岩土体蠕变之间的计算关系。通过理论计算值和模型试验数据的对比分析，进一步说明了耦合效应模型的正确性、合理性和有效性，把锚索预锚固应力变化和坡体蠕变进行耦合考虑的模型是正确的，与工程实际情况相符合，特别是对于锚索间距相对较小和锚索自由段较长情况下的预应力锚索锚固工程。

(3) 通过耦合效应模型的蠕变方程，在材料参数已知的情况下，可以计算出边坡蠕变引起的锚索预应力损失量，并结合实际工程中监测到的锚索应力数据进行对比分析，就能够确切地了解、评价锚索预应力的异常变化情况，预应力锚索锚固工程的设计、施工和安全运行具有指导意义。

(4) 通过耦合效应模型的松弛方程，对预应力锚索受力状态的监测数据进行分理，通过对锚索预应力损失量的数据进行分析，分析岩土体的蠕变参数，根据蠕变介料特性，计算岩土体蠕变量，根据蠕变量，应力锚索锚固工程的安全性和可靠性，对工程的安全运行管理具有重要作用。

(下转第...)

(3) 保证钢绞线与锚具单元孔位对应, 夹片与锥孔配合精确, 夹片与钢绞线咬合均匀, 夹片端面平齐, 两片端部不平度要求小于0.5mm, 锚具最低使用应力要求大于 $0.11\sigma_b$ 。

(4) 封锚前根据结构与系杆特性设计要求用砂轮切割机整齐切除相应的多余钢绞线, 不可采用火焰切割。

(5) 钢绞线应操持清洁, 避免泥土或腐蚀物质粘附于裸露的钢绞线上, 张拉结束后, 要求灌注防护油脂进行防护。对可换索式系杆锚具密封筒内和保护罩内灌油是系杆锚固体系的一项重要防护措施, 先不安装保护罩, 对锚具密封筒内进行灌油, 应顺从低进高出的原则, 从锚板底部进油, 上部出气, 直到出气口流出油脂浓度与灌进浓度一样为止, 安装好保护罩, 同样在保护罩内灌满防腐油脂, 灌油后封好灌油孔和排气孔, 将锚具外表面清洁干净。

5 结语

(1) 该桥系杆索力需要分级调整, 旧系杆

分级卸载索力, 并且确保上下游总系杆不平衡张拉力在2000kN范围内;

(2) 系杆放张采用组合撑脚方式进行放张, 可把系杆张力完全放至为零;

(3) 准确计算新系杆索的下料长度, 控制剥除PE的长度, 避免钢绞线工作长度不够或者过剩, 导致钢绞线裸露在外;

(4) 四个点同步对称张拉, 确保索力均匀性和满足应力要求;

(5) 钢绞线系杆体系的施工工艺逐步成熟, 使用设备轻巧;

(6) 该索采用多层防护, 防护层次明确, 其耐久性优于一般系杆索。

参考文献

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [2] 陈天本. 桁式组合拱桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [3] 金成棣. 预应力混凝土梁拱组合体系桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [4] 向中富. 桥梁施工控制技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [5] 何思明, 王全才. 预应力锚索作用机理研究中的几个问题[J]. 地下空间工程学报, 2006, 2(1):160-165
- [6] Rakesh Kumar, K.G.Sharma, A.Varadarajan. Post-peak response of some metamorphic rocks of India under high confining pressures [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47(8): 1357 - 1362.
- [7] KyungsooChung. Prediction of pre- and post-peak behavior of concrete-filled circular steel tube columns under cyclic loads using fiber element method[J]. Thin-Walled Structures, 2010, 48(2): 169 - 178
- [8] Helene, P., Pereira, M.F., Castro, P. Performance of a 40-year-old concrete bridge with embedded, prestressed galvanized strands, Materials Performance, Oct. 2008, 43(10): 42-455.
- [9] 张咸恭, 王思敬等. 工程地质学概论[M]. 北京: 地震出版社, 2005, 6-16
- [10] 丁多文, 罗国煜. 预应力锚索加固岩体的应力损失分析[J]. 工程地质学报 1995.1, 65-69.
- [11] 陈安敏, 顾金才等. 软岩加固中锚索张拉吨位随时间变化规律的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程, 2002, 21(2):251 - 256.
- [12] 高大水, 曾勇. 三峡永久船闸高边坡锚索预应力状态监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 20(5):653-656
- [13] 李端友, 汤平, 李亦明. 三峡永久船闸一期工程岩锚预应力监测[J]. 长江科学院院报, 2009, 17(1):39-41.
- [14] 何思明, 乔建平, 王成华. 预应力锚索群锚效应研究—理论与建模[J]. 中国科学, 2003.6.
- [15] 陆锡铭, 朱哈达. 破碎岩质边坡中群锚效应试验研究[J]. 2005, 6: 66 - 80
- [16] 朱哈达. 破碎岩质边坡锚固技术研究[D]. 浙江大学. 2005: 113 - 120.
- [17] 朱哈达, 尚岳全, 陆锡铭等. 锚索预应力长期损失与坡体蠕变耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2005.27(4). 464 - 468.
- [18] 叶惠飞. 锚索预应力损失变化规律分析[D]. 浙江大学. 2004. 38 - 51
- [19] 朱本珍, 王建松, 郑静等. 锚索长期工作性能检测与荷载补偿技术研究. 岩土力学, 2011, 32(增2): 683 - 687.
- [20] 聂彪, 王建松, 高和斌, 梁龙龙等. 高边坡锚索结构预应力检测及补强修复技术的应用[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增1): 239 - 241.
- [21] 马长乐, 吴拥政, 何杰. 预应力损失对高预应力全锚索支护技术的影响[J]. 煤矿开采2012, 17(2), 61-72.
- [22] 陈成文, 喻成亮, 王永兴等. 超长预应力束有效预应力测试与研究. 公路, 2013.1.144-148.
- [23] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 200 - 220.
- [24] Ghorbanpoor Al, Magnetic-based NDE of steel in prestressed and post-tensioned concrete bridges, Proceedings of SPIE---The international society for optical engineering, 1998, v 3400: 343-347.
- [25] 阎莫明, 徐祯祥, 苏自约. 岩土锚固技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.148 - 167.
- [26] 褚晓威. 小孔径预应力锚索预应力损失机理及试验研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2010.6-16.
- [27] Hazzard J F, Young R P. Dynamic modeling of induced seismicity. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences., 2004, 41(12): 1365-1376.
- [28] 张发明, 刘宁. 影响大吨位预应力长锚索锚固力损失的因素分析[J]. 岩土力学, 2003(4):194-197.
- [29] 夏熙伦. 工程岩石力学[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1998. 57 - 87.
- [30] 李双一, 王艳琴, 张一玉. 浅谈后张法预应力施工过程中应力损失分析及控制[J]. 辽宁交通科技. 2005(9):52-56.
- [31] 王清标. 孔道成孔工艺对锚固力损失的分析与控制[J]. 山东大学学报(工学版), 2009(4) 145-148

(上接第22页)

参考文献

- [1] 何思明, 王全才. 预应力锚索作用机理研究中的几个问题[J]. 地下空间工程学报, 2006, 2(1):160-165
- [2] Rakesh Kumar, K.G.Sharma, A.Varadarajan. Post-peak response of some metamorphic rocks of India under high confining pressures [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47(8): 1357 - 1362.
- [3] KyungsooChung. Prediction of pre- and post-peak behavior of concrete-filled circular steel tube columns under cyclic loads using fiber element method[J]. Thin-Walled Structures, 2010, 48(2): 169 - 178
- [4] Helene, P., Pereira, M.F., Castro, P. Performance of a 40-year-old concrete bridge with embedded, prestressed galvanized strands, Materials Performance, Oct. 2008, 43(10): 42-455.
- [5] 张咸恭, 王思敬等. 工程地质学概论[M]. 北京: 地震出版社, 2005, 6-16
- [6] 丁多文, 罗国煜. 预应力锚索加固岩体的应力损失分析[J]. 工程地质学报 1995.1, 65-69.
- [7] 陈安敏, 顾金才等. 软岩加固中锚索张拉吨位随时间变化规律的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程, 2002, 21(2):251 - 256.
- [8] 高大水, 曾勇. 三峡永久船闸高边坡锚索预应力状态监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 20(5):653-656
- [9] 李端友, 汤平, 李亦明. 三峡永久船闸一期工程岩锚预应力监测[J]. 长江科学院院报, 2009, 17(1):39-41.
- [10] 何思明, 乔建平, 王成华. 预应力锚索群锚效应研究—理论与建模[J]. 中国科学, 2003.6.
- [11] 陆锡铭, 朱哈达. 破碎岩质边坡中群锚效应试验研究[J]. 2005, 6: 66 - 80
- [12] 朱哈达. 破碎岩质边坡锚固技术研究[D]. 浙江大学. 2005: 113 - 120.
- [13] 朱哈达, 尚岳全, 陆锡铭等. 锚索预应力长期损失与坡体蠕变耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2005.27(4). 464 - 468.
- [14] 叶惠飞. 锚索预应力损失变化规律分析[D]. 浙江大学. 2004. 38 - 51
- [15] 朱本珍, 王建松, 郑静等. 锚索长期工作性能检测与荷载补偿技术研究. 岩土力学, 2011, 32(增2): 683 - 687.
- [16] 聂彪, 王建松, 高和斌, 梁龙龙等. 高边坡锚索结构预应力检测及补强修复技术的应用[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增1): 239 - 241.
- [17] 马长乐, 吴拥政, 何杰. 预应力损失对高预应力全锚索支护技术的影响[J]. 煤矿开采2012, 17(2), 61-72.
- [18] 陈成文, 喻成亮, 王永兴等. 超长预应力束有效预应力测试与研究. 公路, 2013.1.144-148.
- [19] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 200 - 220.
- [20] Ghorbanpoor Al, Magnetic-based NDE of steel in prestressed and post-tensioned concrete bridges, Proceedings of SPIE---The international society for optical engineering, 1998, v 3400: 343-347.
- [21] 阎莫明, 徐祯祥, 苏自约. 岩土锚固技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.148 - 167.
- [22] 褚晓威. 小孔径预应力锚索预应力损失机理及试验研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2010.6-16.
- [23] Hazzard J F, Young R P. Dynamic modeling of induced seismicity. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences., 2004, 41(12): 1365-1376.
- [24] 张发明, 刘宁. 影响大吨位预应力长锚索锚固力损失的因素分析[J]. 岩土力学, 2003(4):194-197.
- [25] 夏熙伦. 工程岩石力学[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1998. 57 - 87.
- [26] 李双一, 王艳琴, 张一玉. 浅谈后张法预应力施工过程中应力损失分析及控制[J]. 辽宁交通科技. 2005(9):52-56.
- [27] 王清标. 孔道成孔工艺对锚固力损失的分析与控制[J]. 山东大学学报(工学版), 2009(4) 145-148